

# 已建成投产的切向燃煤粉 NOx 排放 的技术措施

作者：N.Bourguin；G•Camody；R•Lewis  
Alstom 性能目标

## 摘要

美国环保局 NOx 排放限量法 I 以及世界多国的空气污染法均强制要求燃煤的 NOx 排放量不得大于 0.15lb/MBtu。自切向燃煤粉的技术表明了有的 NOx 低排放技术可以达到法的要求。技术主要关心的是技术或合用能最有效地达到法的要求。

本文 Alstom 的最新切向燃煤粉 NOx 排放技术作一重要的回顾；主要叙述各种排放技术或合用性能有效地达到排放目的，同时又能确保目前放松管制后的电力界机组保持高效率的需求。本文同时也列出了一些 NOx 排放的技术数据及排放系数和和一些系最近的成本数据。

## 前言

有法以及法越收越收的走向，使得后烟催化 (SCR) 技术成新建燃煤机必装的一不成文的定。新机的设计者几乎都用及后 NOx 排放技术合足排放法要求。多技术的合用使得 NOx 排放能松，同时也使机自身仍然保持高的效率及可用性。成本数据示，合排 NOx 技术的合的投可以在短期靠增加催化的寿命以及少的使用量收回。

已投产的机就不那。在加装排放装置，设计者要考虑有的限制，各相互之的影响以及排放系要求的运行方式。更低燃器的成本以及所引起的效率降低和机本身和所用燃料密切相关。

和新机不同，有机 NOx 排放技术

不一定非采用 SCR。如果某些家 NOx 排放法不要求每一台机都必达到低于最高排放限量的，那先着重考虑用的方法使全系算的法足排放法要求，而不是着眼每一台机。高排放小机的量超排放可以由系基本负荷的大机的低于排放上限得的裕量弥补。一期限的累超排放可以靠排放指数解决。些法使得体上最法排放得活可行，可以最大程度的少全系的排投资和运行。

## NOx 运行方略

Alstom 通过建一全新保方案，利用公司所有源解决保。些源包括自：Alstom 空器部；站部、客服部、保系部、站室部、目易部。考虑了系中一切有潜在可能排 NOx 的方法实施略。已在煤取，煤粉制、燃上做了估。有的多 NOx 排放技术都效率有或多或少的面影响，汽机的性能可能也有影响，在方面也做了估。后烟作一主要方案也其做了分析。Alstom 在后技术领域中，如 SCR, SNCR 均有不少家。原上体排策略方案是化合各排技术的特点加以施。一相重要的制因素是要考虑新加装排在土建安装方面出的。Alstom 有能力在安装方面有潜在的目的运行估，找出新的解的具体方案。

同时重要的是各排放技术其下一流程及其运行生影响，其下游的性能及可靠性生影响。我已做了估。弄

一些方面影响的本和其严重程度是相关的,以便有可能在...可能少。同时把一些因素加到目的分析报告中。

了解...主的要求,作出改造目的精确估计很重要。如...负荷,配...要求,机...期停...安排,未...燃料...化走向, ...期...命,以及...主要...机(空...器、...机、...控、...及烟...道)的一些...均要仔细考...。估计的最后一步是...定最佳最...的方案。所做方案可能...有些机...改后性能有所限制;...有些机...性能超...要求;有的只适合...施部分技...措施,或者有的干脆不适合做改造。

### Alstom 低...燃...系...

Alstom 已...出一...低...燃...系...的系列,以配合各...燃煤...燃用不同燃料的需要。其五...基本系...,按其...程度...序,分...是 LNCFS-P2; LNCFS-I; LNCFS-II; LNCFS-III 及 TFS2000-R。图 1 是...的基本配置情况表。...五...系...都采用了下列基本低...燃...技...措施:分...送...燃...;燃料提早...;以及局部燃...空...分...。...几...方案的不同之...是 NOx ...排效果大小;系...的...程度;改造材料的成本投入多少以及改造要求之不同。每...方案...施后比未改造前的基本排放量要...多少,...要和原机...本身及所用燃料有...。Alstom ... 1970 年起就推出了燃... ..基本型低...燃...系...。... 1980 年起, ...了 LNCFS 低...燃...系...。... 1980 起, ...共 218 台...容量... 68,000MW 四角燃...机...施了低...燃...技...改造。所改造机...的容量有... 44MW 的工... ..一直到 900MW 的超...界... ..机...。

### NOx 生成机理

NOx 的生成是通过一系列的...化...反..., ...受到机...本身..., ...行工...及燃煤品...的影响。...化合物是由空...中的...和燃料中的...化而生成。...二...不同途...生成的...化合物分...之...力型 NOx 和燃料型 NOx。...力型 NOx 的生成速率取决于燃...中的...度和...度;燃料 NOx 占... NOx 生成量的... ..取

于燃料中以有机形式存在的...元素的多少以及...有多少在燃... ..程中被...化而定。每... ..一机...的比例和其燃煤的品...和...行...件...化很大。一般燃煤机...中燃料 NOx 的比例占... NOx 的 80%左右。燃料 NOx 的生成可以通过限制燃... ..程中的空...量...降低。

最早由 Fenimore 提出的第三... NOx 生成机理...之...快速型 NOx。...是由燃料中的... ..化合物半分解形成的碎片和空...中的...快速反...生成的。一般..., ...快速型 NOx 占... NOx 生成量中的 5%左右。按 Fenimore 理..., ...有的各...低...燃...技... ..力型 NOx 的生成抑制效果有限。因此, ...了控制 NOx 的...生成量,必要的手段是迅速引燃煤粉;控制燃... ..度;以及控制燃... ..程中可能取得的... ..量。

### 燃... ..

燃... ..是已...成熟和有效的 NOx ...排技..., ...已...用于很多切向四角燃...煤粉...。其原理是分流一部分二次... ..而引入... ..主燃... ..上部,以...少主燃...的...量。Alstom 推出了二... ..型的燃... ..口布置方式用于其 LNCFS 低...燃...系...:一...是... ..燃... ..口布置(close-coupled overfire air,CCOFA);另一...是分离燃... ..口布置(separated overfire air,SOFA)。... ..二... ..口的... ..或... ..合... ..用,就... ..成了 LNCFS 低...燃...系..., ... 2 是 LNCFS-III 低...燃...系...的布置。图 3 是 TFS-2000R 系...的布置, ... ..用于燃用低活性煤。

| Standard Windbox | LNCFS P-2 | LNCFS Level I | LNCFS Level II | LNCFS Level III | TFS2000R     |
|------------------|-----------|---------------|----------------|-----------------|--------------|
|                  |           |               |                |                 | SOFA<br>SOFA |
|                  |           |               | SOFA<br>SOFA   | SOFA<br>SOFA    | SOFA<br>SOFA |
| AIR              | VOCOFA    | COFA          | COFA           | COFA            | COFA         |
| COAL             | P2 COAL   | COAL          | COAL           | COAL            | COAL         |
| AIR              | CFS™ AIR  | COAL          | CFS™ AIR       | COAL            | CFS™ AIR     |
| COAL             | P2 COAL   | COAL          | COAL           | COAL            | COAL         |
| AIR              | CFS™ AIR  | CFS™ AIR      | CFS™ AIR       | CFS™ AIR        | CFS™ AIR     |
| COAL             | P2 COAL   | COAL          | COAL           | COAL            | COAL         |
| AIR              | CFS™ AIR  | CFS™ AIR      | CFS™ AIR       | CFS™ AIR        | CFS™ AIR     |
| COAL             | P2 COAL   | COAL          | COAL           | COAL            | COAL         |
| AIR              | CFS™ AIR  | CFS™ AIR      | CFS™ AIR       | CFS™ AIR        | CFS™ AIR     |
| COAL             | P2 COAL   | COAL          | COAL           | COAL            | COAL         |
| AIR              | AIR       | AIR           | AIR            | AIR             | AIR          |

图 1 Alstom 各低...燃...系... ..口布置

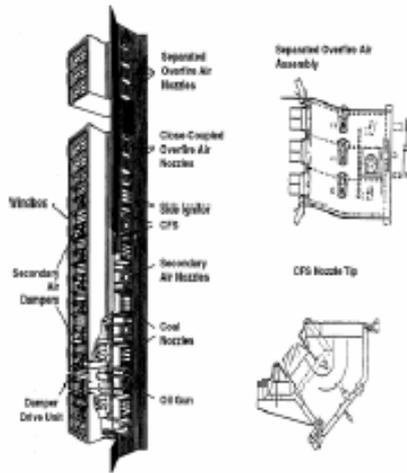


图 2 典型 Alstom LNCFS-III 燃 口布置示意

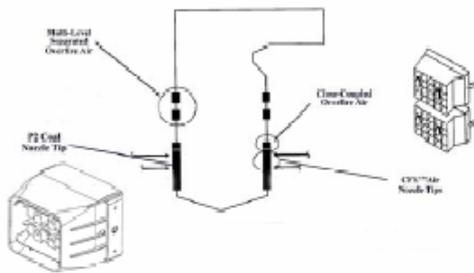


图 3 TFS2000R 系 布置示意 (燃料 烟煤, 采用 PZ 型一次 )

燃 (OFA) 的主要 要按 排目 , , , , , 的 入 量; 燃 特性以及改前 行 而定。Alstom 燃 中一 特色是其具有水平 系 (已有 利) 功能的燃 。通 置人工 使得燃 能充分混合, 少 CO 的生成。 功能不是 了 NOx 控制目的, 而是用 校准新增的 排系 后正式投 。而 LNCFS-P2 系 所用的 CCOFA 口或 叶片的 VCCOFA (vaned CCOFA) 口 上述有所不同。VCCOFA 不用 , 用 原理使空 最大程度地流 口, 偏射离 燃料富集 , 以 到 和最 少 NOx 生成之目的, 图 4 VCCOFA 的示意 。

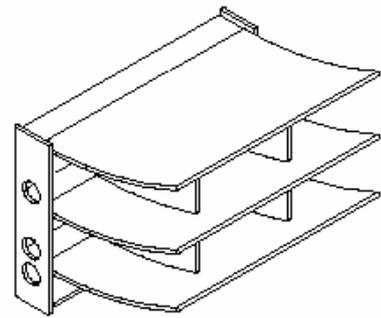


图 4 VCCOFA 燃 口示意

### “火焰前沿控制”煤粉 嘴

在 LNCFS 及 TFS2000R 低 系 中 用了另一 低 控制的重要特性, 即在 境下使燃料提早 。常 的燃 系 , 煤粉在富 境下 , 所析出的燃料 迅速 生成 化合物。用上了 LNCFS 及 TFS2000R 低 燃 系 后, 在靠近煤粉 嘴的地方, 煤的 物迅速析出, 形成了一 火焰 面。 做除了 NOx 控制上的好 外, 着火迅速, 改善了火焰的 定性 且 少了由于增 低 燃 系 所引起的未燃 增加。LNCFS-P2 低 燃 系 所用的煤粉 嘴 口如图 5 所示, 是 低 NOx 燃 系 的。根据所改造 目本身的特点, 如火焰特性, 燃煤成 及特性, 煤粉管道的 送 件, 以及未改前的 行 , 每 目的煤粉 嘴 有其自身之特点。

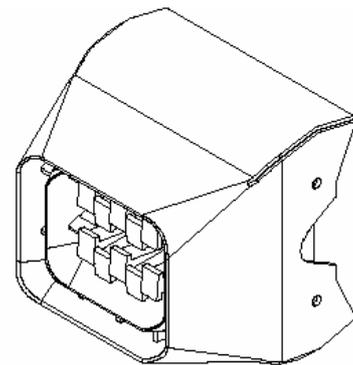


图 5 LNCFS 系 所用煤粉 嘴

### CFS 同心燃 系

CFS 同心燃 系 是 利注 的分 燃 系

，引部分二次偏离主燃料流所生成的主切而形成一同心于主切的燃料切。使主切附近空燃料化量比少。CFS 燃料系中富粉流和空流的流向分布如图 6 所示。被分流出的部分二次由 CFS 系的口送入。按不同具体情况，由于送入 CFS 空流的措施，使水冷壁附近保持有一化氛，而小了水冷壁附近的机，以及其他由于燃器附近低剩空系所致的。

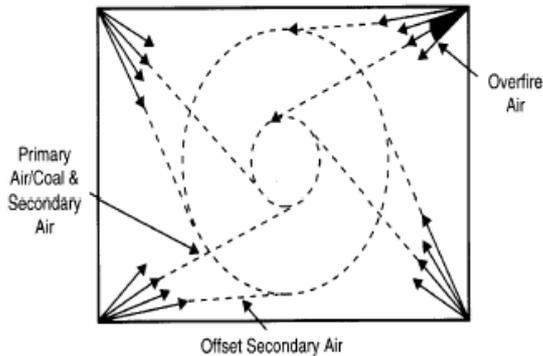


图 6 LNCFS 中粉流和空流向示意

### TFS2000R 系的

TFS2000R 低燃料系的的思想是合各排的技措施：如精确控制剩空，煤粉度控制，燃初始段的控制，通 CFS 行淡同心切燃。合了目前多方位的排技措施于一体。多 SOFA 燃口的用最大程度地少 NOx 的生成，同又低了 CO 的生成及未燃的失。根据燃煤品的差，磨煤机可以考改装分离器改善制粉度，以期一步降低未燃的量。

### Alstom 低 NOx 燃料系改造的具体

Alstom 迄今已 215 台切向燃机的行了低 NOx 燃料系的改造。些改造项目涵盖了所列四 LNCFS 系及 TFS2000R 系。所改造的机 44MW 的工到 900MW 的超界。

改造涵盖了褐煤到烟煤广泛的煤。

图 7 是改装 LNCFS-I 低 NOx 系的其在最大出力下排放容量的系。图 8、9、10 所示的是分改装 LNCFS-II、LNCFS-III 及 TFS2000-R 低 NOx 系后，NOx 在最大出力下的排放量容量的系。中所示，据图 7 示了 LNCFS 系各容量的都相有效。要指出里有一 NOx 排放量和容量的直接系，其一些如煤、、以及行工均 NOx 排放有不小影。

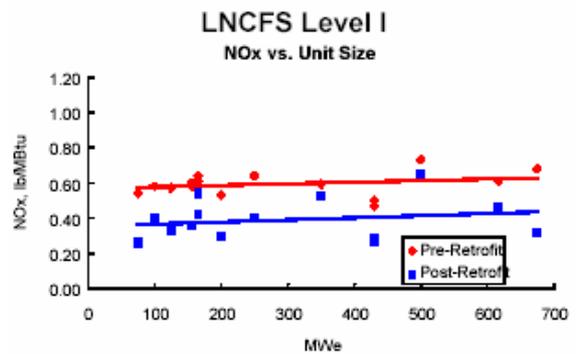


图 7 LNCFS-I：NOx vs. 容量

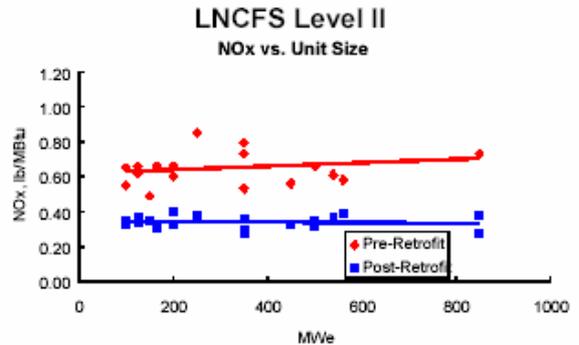


图 8 LNCFS-II：NOx vs. 容量

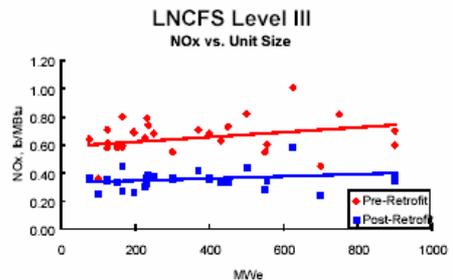


图 9 LNCFS-III：NOx vs. 容量 灰含量 NOx 系 磨煤机已改分离器

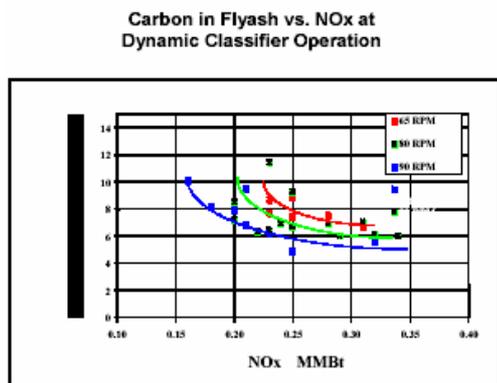


图 10 TFS2000-R 系统：NOx 与未燃碳的关系（燃煤煤）

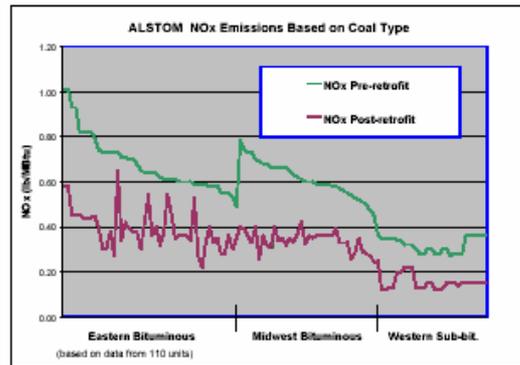


图 11 低 NOx 燃烧系统不同煤种改造前后 NOx 排放对比

有关 LNCFS 及 TFS2000-R 低 NOx 燃烧系统的其他方面的数据信息，读者可参阅本文参考文献 3、4、5、6、7 及 8。一起，我们可以：

- 未燃碳的损失反比于 NOx 的减少；
- 炉膛容积热负荷越高，NOx 排放越高，水冷壁上渣机增加；
- 小的炉膛容积产生高的未燃碳损失，或排放潜力低；
- 低品位煤的 NOx 排放低，同时未燃碳损失也小，其炉膛效率可能受到一些负面影响，主要是由于未燃碳增加的原因。

任何一低 NOx 燃烧系统原炉膛效率的负面影响受到原炉膛很多特定因素的影响，如机原炉膛尺寸、高度及炉膛热负荷均对 NOx 生成很有影响。炉膛运行如机热负荷（基本负荷，负荷度等），控制的可控范围及可控精度均对 NOx 生成。正如前面所述，炉膛有的大量机在炉膛和操作上有大的变化范围，因此 Alstom 必须设计出足不同情况的低 NOx 燃烧系统。

除上述外，燃煤煤种也是一最有影响 NOx 排放的因素。

图 11 是低 NOx 燃烧系统改造前后 NOx 排放水平的对比数据，这些数据是收集前 10 年共 110 台切向燃烧系统改造前后的数据。这些数据包括了 Alstom 改造的低 NOx 燃烧系统所有示范项目的数据。如图 11 所示，炉膛的方向是煤的活性好，低 NOx 的排放要求易于达到。虽然不是一炉膛的方向，但炉膛上数据点的波动上可看出这一方向。

Alstom 在美国的运行数据也表明了活性高的煤生成相对较低的 NOx。2001 年，美国环保署网站提供全美所有炉膛的年均 NOx 排放水平，此网站上可以看到前几年的数据。数据表明 20 台最低排放燃煤机中有 19 台机装有 Alstom 低 NOx 燃烧系统。图 12 给出这些数据。NOx 的排放是以磅/百万英热单位 (lbs/Mbtu) 表示的。

Performance Projects  
Low NOx Capabilities  
ALSTOM

EPA data for 2001 reveal that 19 of the 20 lowest emitting coal units use Alstom-supplied low NOx Firing systems

| No. Unit         | State | NOx  | System   | No. Unit     | State | NOx  | System   |
|------------------|-------|------|----------|--------------|-------|------|----------|
| 1 Polk           | FL    | 0.10 | CGCC*    | 11 Baldwin 3 | IL    | 0.14 | TFS 2000 |
| 2 Labadie 1      | MO    | 0.11 | LNCFS    | 12 Parish 7  | TX    | 0.14 | TFS 2000 |
| 3 Labadie 2      | MO    | 0.11 | LNCFS    | 13 Joppa 1   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 4 Labadie 3      | MO    | 0.11 | LNCFS    | 14 Joppa 2   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 5 Labadie 4      | MO    | 0.11 | LNCFS    | 15 Joppa 3   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 6 Joliet 29 - 71 | IL    | 0.12 | TFS 2000 | 16 Joppa 4   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 7 Joliet 29 - 72 | IL    | 0.12 | TFS 2000 | 17 Joppa 5   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 8 Rush Island 2  | MO    | 0.12 | LNCFS    | 18 Joppa 6   | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 9 Waukegan 8     | IL    | 0.13 | TFS 2000 | 19 Newton 1  | IL    | 0.15 | LNCFS    |
| 10 Rush Island 1 | MO    | 0.13 | LNCFS    | 20 Newton 2  | IL    | 0.15 | TFS 2000 |

\*Coal Gasification Combined Cycle demonstration unit

图 12 美国环保署数据：2001 年平均最低 NOx 排放机组

图 12 结果表明, 虽然 TFS2000-R 是最具活力的 Alstom 低 NOx 燃烧系统, 但并不一定非得用其降低改机的 NOx 排放水平。Alstom 的解决 NOx 排放途径是综合考虑了有机物的各种因素, 客户选取一最最有效的 NOx 排放方案。

### 水冷壁腐蚀方面的研究

按 LNCFS 及 TFS2000-R 低燃烧系统改造的切向燃煤粉炉 215 台机组中, 其中 150 台以上已运行超过二年以上。最近报告表明, 有 5% 的机组, 出现水冷壁腐蚀加速, 有些机组都是按 LNCFS-III 方案改造的。除了一例外, 有些机组都是运行 8 角燃煤粉炉。一般事先也预料到运行会产生这种情况。Alstom 的基本看法是: 有些机组改造后水冷壁腐蚀或腐蚀加速现象的出现, 可能本身就存在腐蚀, 或者燃煤中含硫高, 高的炉膛负荷或者采用炉膛中隔墙。

### 新技术的发展

由于市场需求的变化, 推动新技术的发展。Alstom 在相当大的范围内运行。例如, 排放指标要求严格, 准确排放的方法就很需要。为了满足需求, 改机有各种方法, 一种神经网络模型就应运而生。神经网络的方法是用多因子非线性回归做出一个公式。神经网络法的好处是神经网络的精度随着数据收集而不改善。在改机精度方面的第二重要领域是改机量的精度, Alstom 正在研究和完善煤粉炉物析出的模型, 用神经网络估煤粉中物析出。Alstom 认为, 得到的物析出量比按 ASTM 标准估计的通常要高, 而不少。研究成果大大地改变了煤的燃烧模型, 从而有方法精确地分析燃料物分, 以及灰含量。

神经网络机理研究在进一步深化。可取的力场来源在也多了, 可以计算流体应力一起用于煤的燃烧模型。

在煤粉炉嘴方面, 现在也有了很大改进。以前煤粉炉嘴是一种消耗部件, 因处于高温及易磨环境中, 用不了几年。Alstom 现在采用先进材料, 如用陶瓷做炉嘴, 使其更

能抗老化, 抗疲劳及磨损。新材料加上优化使得炉嘴的寿命有可能延长一倍。

最近的成果是燃料-空气均衡系统 (Fuel Air Balancing, FAB)。由于 NOx 排放上限不在下降收, 因此必须可能生成 NOx 的各种增加控制。如果能做到每一燃烧器进行精确地量和均衡配, 具有的机组装可以取降低 NOx 的潜力。产品目前在 Alstom 运行, 已在美运行, 以期投入后可更好地控制。

### 低改目的分析

一机组的改造, 一般技术上有几种可行方案供。的核心是如何去平衡投资、性能, 以及改后机组的影响, 以期整体上取得最佳效果。而多台机组系的方案分析比, 由于大大增多, 困难性大大增加了。如果分析是按部就班地去做, 通过低投资系分析以及避免措施重及超排等因素, 最好的方案是可以出的。

每机组, 最基本的排放有:

- A. 燃烧系统运行调整, 或做一些基本的改造;
- B. 燃烧系统更新, 可能包括 SOFA 系统, 磨煤机及控制系统;
- C. 加装 SCR;
- D. 上述各项措施合使用。

上面各项技术措施是按降低 NOx 有效性的排列的。方案 A 做起投资小, 一般 NOx 排放可以做一些降低。因此, 那此有硬性排任的, 投资是算的, 所以相有吸引力。方案 B, 然也已合了方案 A, 投资中等, 但 NOx 可以有相多的下降, 在多种情况下, 可以满足要求。方案 C 已在大多数情况下可以到新的强制排放上限的指标, 但投资可, 运行也不小。方案 D 然是最好的方案, 但可以通过降低 SCR 的运行成本, 运行的点看, 仍不失为一最好的方案。

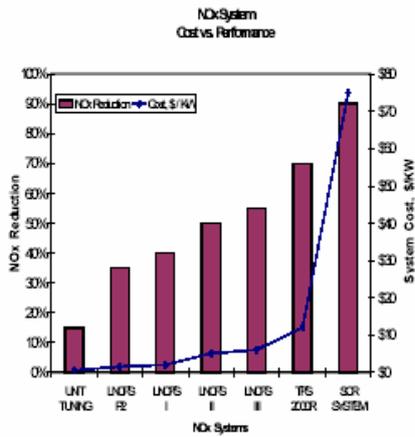


图 13 NOx 减排系统的成本与性能分析

图 13 列出各减排方案的成本及其减排效果。此表按一台 200MW 机组及加装中等困难程度的情况作分析。目的确切分析是和机组具体情况：如燃煤、炉型、系统的相互影响，是否有空地等因素大大有关。

图 14

NOx 减排系统目的最投入受到很多因素的控制和排放法的选择。有些因素目前不能很明确界定的。政府的排放法受到自技术界和法律方面的挑战而作不修正。且不管最出台的排放法是什么，一适用于所有机组的方案是不存在的。每一系统都必须按自己的特点确定采取什么的最佳减排技术方案，以期达到最低投入，有效和可靠的系统。

文献

1. Singer, J. G., (editor), Combustion, Fossil Power, A Reference Book on Fuel Burning and Steam Generation, Fuel-Firing Systems, Fourth Edition, 1991.
2. Fenimore, C. P., Formation of Nitric Oxide from Fuel Nitrogen in Ethylene Flames, Combustion and Flame, 1972.
3. Hart, D., Phase I Tangentially-Fired Unit Low NOx Operating Experience, ALSTOM POWER publication, TIS 8648, 1997.
4. Buffa, T., LaFlesh, R., Marti, D., In-Furnace,

Retrofit Ultra- Low NOx Control Technology for Tangential, Coal-Fired Boilers: The ALSTOM POWER C-E Services\_ TFS2000\_ R System, EPRI/EPA 1995 Joint Symposium on Stationary NOx Control, 1995, reprinted as ALSTOM POWER publication TIS 8623, 1996.

5. Hardman, R. R., Smith, L. L., Tavoulareas, S., Results from the ICCT T-Fired Demonstration Project Including the Effect of Coal Fineness on NOx Emissions and Unburned Carbon Levels, EPRI/EPA 1993 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control, Miami Beach, FL, 1993.

6. Crisler, J. Hunt, Marti, D., Rodgers, Dr. R., Strich, G., Sutton, J., Decreasing Unburned Carbon in Flyash: Field Results with ALSTOM POWER\_s Advanced DYNAMIC\_ Classifier, ALSTOM POWER publication TIS 8642, 1996.

7. Hager, M., Camody, G., Lewis, R. D., Maney, C. Q., Towle, D. P., Cost-Effective NOx Reduction for Tangentially Fired Boilers, ALSTOM POWER publication TIS 8653, 1998.

8. Gessner, T. M., Roger H., Hoh, R. H., Ray, B., Dorazio, T., Sikorski, K., Jennings, P. L., NOx Emissions Retrofit at Reliant Energy, W.A. Parish Generating Station, Unit 7: Achieving 0.15 lb/Mbtu, ASME International. Joint Power Generation Conference, San Francisco, CA, July 1999.

9. M.B. Cohen, T.D. Hellewell, R.C. Kunkle, K.A. Nowak, Integrating NOx Control Technologies For New Tangential Coal Fired Steam Generators, EPRI/EPA 1993 Joint Symposium on Stationary Combustion NOx Control, reprinted as TIS 8603, 1993.

(周志强 译)